

CALCULO DE LA INTENSIDAD JMA PARA REGISTROS DE MOVIMIENTO FUERTE DEL LABORATORIO DE INGENIERÍA SÍSMICA EN COSTA RICA ¹

Aarón Moya ²

Resumen: Se calculó la intensidad JMA para todos los eventos importantes que el Laboratorio de Ingeniería Sísmica (LIS) ha registrado desde 1990. Primero se realizó una preselección de la información tomando los eventos que habían sido registrados en más de cinco sitios. Luego se graficó cada uno para hacer una inspección visual y descartar aquellos que pudieran tener un nivel de ruido alto o cuya forma de onda no fuera de buena calidad. A cada componente de los registros de aceleración se le aplicó un filtro en el dominio de las frecuencias, posteriormente en el dominio del tiempo se calculó la suma vectorial de cada registro y se ordenaron los datos de amplitud en orden descendiente. Se tomó el valor de amplitud al instante 0.3 s para calcular la intensidad instrumental. Los resultados se muestran en forma de gráficos que relacionan el valor de JMA con la aceleración máxima y en forma de mapas que muestran la distribución espacial de intensidades.

Palabras clave: Acelerógrafo, intensidad sísmica, aceleración máxima, ingeniería sísmica, terremoto, espectro.

JMA INTENSITY ESTIMATION FOR THE COSTA RICA EARTHQUAKE ENGINEERING LABORATORY STRONG MOTION RECORDS

Abstract: The JMA intensity was calculated for all the important events that the Earthquake Engineering Laboratory (LIS) has recorded since 1990. First, a pre-selection was made taking into account only events that had been recorded in more than five sites. Every record was plotted one by one. Then they were revised by visual inspection in order to rule out those with high noise level or poor waveform quality. A frequency domain filter was applied to each component, then in the time domain, the vectorial summation was computed and data was sorted out in descending order. The amplitude at which the cumulative amplitude reached a value of 0.3 s was taken to calculate the JMA intensity. The results are shown in the form of graphs that relate the value of JMA to the peak ground acceleration as well as maps that show the spatial distribution of intensities.

Keywords: Strong motion accelerograph, seismic intensity, peak ground acceleration, earthquake engineering, spectra.

INTRODUCCIÓN

Luego de un sismo fuerte, es común que los centros sismológicos notifiquen, además de la magnitud del evento y su ubicación espacial, un valor de intensidad sísmica asociado a los distintos lugares donde se sintió el movimiento. Tradicionalmente en Costa Rica, dicho valor ha sido el dado por la escala de Intensidad de Mercalli Modificada (IMM) que se asigna según el nivel de daños reportados por la población o luego de un estudio por parte de expertos en el campo. La IMM consta de doce distintos valores que van desde el grado I que es un movimiento imperceptible hasta el grado XII que es un terremoto altamente destructivo.

¹ Artículo recibido el 22 de agosto de 2019 y aceptado para publicación el 19 de octubre de 2019.

² Laboratorio de Ingeniería Sísmica, Instituto de Investigaciones en Ingeniería, Facultad de Ingeniería, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica cesar.moya@ucr.ac.cr

Si bien Costa Rica cuenta desde los años 1990 con registros acelerográficos, estos raramente han sido utilizados para complementar la información de la IMM. Básicamente el uso de los mismos se ha limitado muchas veces a reportar el valor máximo de aceleración, dejando de lado otras muchas características que se podrían derivar de los mismos como la duración de la sacudida (Trifunac y Brady, 1975; Dobry et al. 1978) o el cálculo de la intensidad espectral (Housner, 1952) o la intensidad de Arias (Arias, 1970).

En años recientes, sin embargo, se han hecho intentos por usar de manera más objetiva los registros acelerográficos en la correlación con los daños producidos por un sismo. Por ejemplo, se han desarrollado ecuaciones empíricas que relacionan la aceleración (PGA) y velocidad (PGV) máximas con la intensidad de Mercalli (Wald et al, 1999; Linkimer, 2008; Tselentis y Danciu, 2008; Worden et al., 2012 por citar unos pocos), que, en algunos casos, se ha llegado a denominar como intensidad instrumental.

Estas relaciones toman únicamente el valor máximo de la aceleración y la velocidad que son valores puntuales del registro acelerográfico. Los valores puntuales, como tal, pueden ocurrir en un instante de tiempo muy corto de los registros, que no necesariamente es el mismo para ambos y que además puede darse en diferentes componentes.

Dichas relaciones son también dependientes de la magnitud y distancia del origen del sismo al sitio de registro. Una determinación imprecisa de la ubicación del sismo o su magnitud implicaría un cálculo erróneo de la intensidad.

La Agencia Meteorológica de Japón (JMA por sus siglas en inglés) desarrolló en 1996 una escala que mide el valor de la intensidad sísmica directamente de los registros de aceleración (Shabestari y Yamazaki, 2001). El cálculo hace uso de las tres componentes de un registro acelerográfico, sin necesidad de conocer la magnitud del sismo ni la localización del epicentro. Además, el proceso de cálculo de la intensidad toma en cuenta la duración de una parte del registro, con lo cual se minimiza el error de que en el mismo se usen valores anómalos de amplitud (picos o spikes).

El hecho de que no sea necesario conocer la magnitud ni ubicación de un evento sísmico para calcular el valor de la intensidad en un sitio de registro, es muy ventajoso. Por un lado, se puede conocer el valor real de la intensidad durante la ocurrencia del sismo. Es decir, no es necesario esperar a que haya un cálculo de los parámetros de la fuente para asignar un valor de intensidad. Por otro lado, no se hace necesario usar ninguna relación empírica para los sitios de registro.

Muchas veces los reportes de la magnitud son dados en diferentes escalas como son la duración de la coda (Mc), de las ondas de cuerpo (mb), de ondas superficiales (Ms) o de magnitud momento (Mw). Según haya sido la derivación de las relaciones empíricas de Mercalli con PGA y PGV, se haría necesario convertir los valores de magnitud a un valor común y esto, además de ser un paso extra en el cálculo de la intensidad, podría representar una nueva fuente de dispersión de la estimación final.

REGISTROS DE ACELERACIÓN

El Laboratorio de Ingeniería Sísmica (LIS), adscrito al Instituto de Investigaciones en Ingeniería (INII) de la Universidad de Costa Rica (UCR), opera una red de acelerógrafos distribuidos en prácticamente todo el país. Esta red ha ido cambiando en cuanto al número de unidades, modelo de éstas y cobertura espacial de las estaciones. Los primeros acelerógrafos eran analógicos. El sistema de registro se activaba cuando se sobrepasaba un cierto nivel de disparo por el movimiento sísmico. Un halo de luz velaba una película fotográfica que avanzaba por medio de un segundero. Más tarde, el rollo fotográfico se debía revelar en el laboratorio y el registro se debía escanear para digitalizarlo. El rango de frecuencias luego del procesamiento era de 0.8 – 23 Hz. Terremotos como el del 25 de marzo de 1990 en Cóbano (Mw 7.0) (Protti et al., 1995), 22 de diciembre de 1990 en Alajuela (Mw 5.9) (Montero y Rojas, 2014) y 22 de abril de 1991 en Limón (Mw 7.7) (Goes et al., 1993) son los eventos más significativos que se registraron con esa tecnología.

Posterior a los acelerógrafos analógicos, aparecieron los convertidores analógicos-digitales llamados QDR. Estos poseían una tasa de muestreo de 100 muestras por segundo y se instalaron en pocos sitios. Durante su periodo de operación se sucedieron los sismos del 20 de noviembre del 2004 en Damas (Mw 6.4) (Pacheco et al., 2006) y del 08 de enero del 2009 en Cinchona (Mw 6.2) (Barquero y Rojas, 2010). En el 2010, gracias a los recursos del Transitorio 1 de la Ley Nacional de Emergencias, la red del LIS se renovó con equipo digital hasta el presente. El número de registros de sismos fuertes creció de la mano del número de estaciones, que en la actualidad es de 140 en

campo libre (estructuras de un piso) y 10 edificios. Todos estos registros digitales poseen un rango de frecuencias de 0.05 a 25 Hz para los que provienen de sensores tipo fuerza balanceada (FBA) y 0.1 a 25 Hz para los de estado sólido (MEMS).

En el 2006 se creó el formato “lis” (Moya, 2006) para unificar las distintas salidas de los programas de cada fabricante. El formato “lis” es un arreglo de datos columnar con información del epicentro, estación, tipo de suelo, etc. En un principio, todos los registros de la red acelerográfica se convertían a este formato, incluso sismos de muy baja magnitud o que hubieran sido registrado en pocas estaciones. Sin embargo, a partir del 2017, solo los eventos que son procesados por el SMA-LIS (Moya, 2017) son convertidos de manera automática al formato “lis”.

A la fecha, el número de registros en este formato es de poco más de 3000. Para este estudio, se hicieron dos preselecciones:

1- Se tomaron únicamente los eventos que hubieran sido registrados en al menos 5 estaciones

2- Se graficaron cada uno de esos registros y se examinaron de manera visual para garantizar que se tratara de una traza de buena calidad. Con buena calidad se da a entender que la forma de onda no mostrara inconsistencias como huecos o que estuviera incompleta.

La base que se analizó se redujo a 2491 registros correspondientes a 126 sismos diferentes desde el 25 de marzo de 1990 al 08 de julio del 2019. Cabe mencionar que muchos de esos registros corresponden a sitios que por diferentes razones ya no forman parte de la red del LIS como la Red SAN (Schmidt et al., 2005) que operó menos de un año.

INTENSIDAD JMA

La estimación de la intensidad JMA se lleva a cabo siguiendo la metodología en Shabestari y Yamazaki (2001) y resumida a continuación:

1. Cada una de las trazas del registro de aceleración es convertido al dominio de las frecuencias aplicando la transformada de Fourier.

2. El espectro de amplitudes es multiplicado por el filtro $F(f)$:

$$F(f) = F_1(f) F_2(f) F_3(f) \quad (1)$$

en donde:

$$F_1(f) = (1 / f)^{0.5}$$

$$F_2(f) = (1 + 0.694x^2 + 0.24x^4 + 0.0557x^6 + 0.009664x^8 + 0.00134x^{10} + 0.000155x^{12})^{-0.5}$$

$$F_3(f) = (1 - \exp(-f/f_0)^3)^{0.5}$$

$$x = f / f_c$$

Este filtro se muestra en la figura 1 y posee un máximo alrededor de 0.5 Hz que es un valor asociado a daños en casas de madera en Japón (Sokolov 2013).

3. De vuelta en el dominio del tiempo, se toma raíz cuadrada de la suma vectorial de las tres componentes.

4. Se toma la amplitud a_0 que tenga un valor de duración acumulada tal que $\tau(a_0) \geq 0.3s$ (Fig 2).

5. El valor a_0 se usa en la ecuación siguiente:

$$I_{JMAI} = 2.0 \log(a_0) + 0.94 \quad (2)$$

Los valores de I_{JMAI} obtenidos de esta manera son continuos y se denominan intensidad instrumental porque son los datos medidos directamente de los equipos. Los datos instrumentales continuos son la base para una escala discreta

de diez valores que van de 0 a 7 y que denominaremos I_{JMA} . Se trata de valores asignados según los rangos mostrados en la tabla 1. Esta escala es también llamada Shindo.

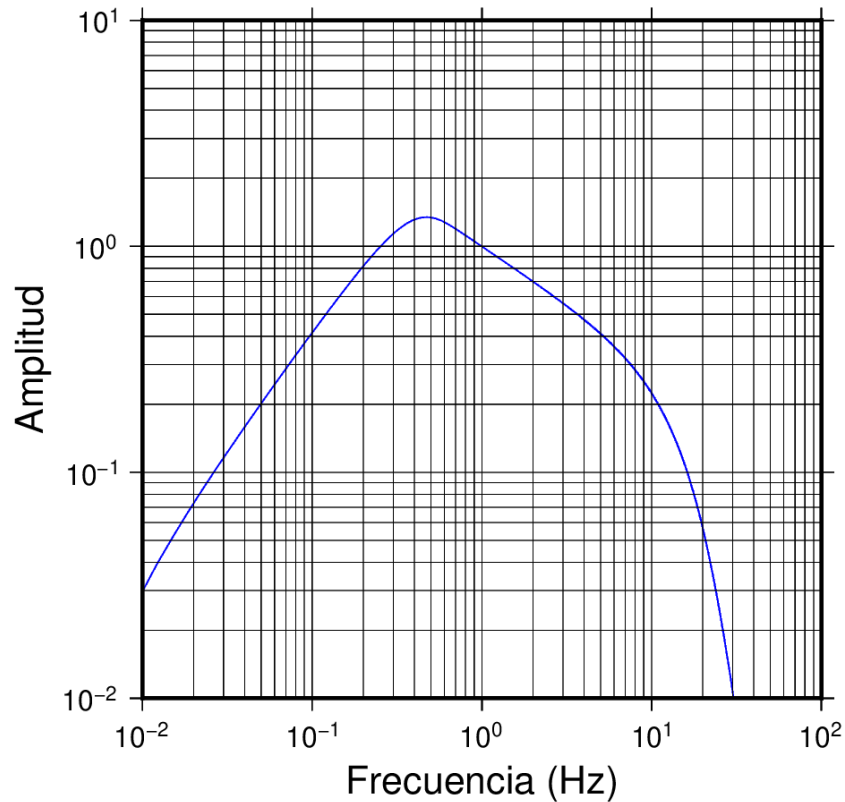


Figura 1. Esquema del filtro utilizado para el cálculo de la intensidad JMA

La descripción del tipo de daños y sus efectos en obras civiles y el paisaje se detallan en el sitio web de la Agencia Meteorológica de Japón. Básicamente valores superiores a 5 es cuando las cosas empiezan a caer por la fuerza de la sacudida hasta llegar a los valores de 6 y superiores que se podrían considerar como terremoto por la cantidad de daños que se podrían presentar.

El valor de I_{JMA} más alto registrado por la red acelerográfica ha sido 6-. Este valor se ha presentado en diferentes sitios por los cuatro eventos indicados en la tabla 2.

Tabla 1. Rangos de valores continuos de intensidad instrumental, I_{JMAI} , y su correspondiente valor discreto, I_{JMA} o Shindo.

I_{JMAI}	I_{JMA}
$0.0 \leq I_{JMAI} < 0.5$	0
$0.5 \leq I_{JMAI} < 1.5$	1
$1.5 \leq I_{JMAI} < 2.5$	2
$2.5 \leq I_{JMAI} < 3.5$	3

$3.5 \leq I_{JMAI} < 4.5$	4
$4.5 \leq I_{JMAI} < 5.0$	5-
$5.0 \leq I_{JMAI} < 5.5$	5+
$5.5 \leq I_{JMAI} < 6.0$	6-
$6.0 \leq I_{JMAI} < 6.5$	6+
$I_{JMAI} \geq 6.5$	7

Tabla 2. Eventos sísmicos y sitios en los que se ha registrado un valor de IJMA = 6-.

Fecha	Mag	Lugar
1990-12-22	5.9	Alajuela Centro
2009-01-08	6.2	Cariblanco de Heredia
2012-09-05	7.6	Nosara, Santa Cruz, San Ramón y Paquera
2019-06-26	6.4	Finca Naranjo y Laurel de Corredores

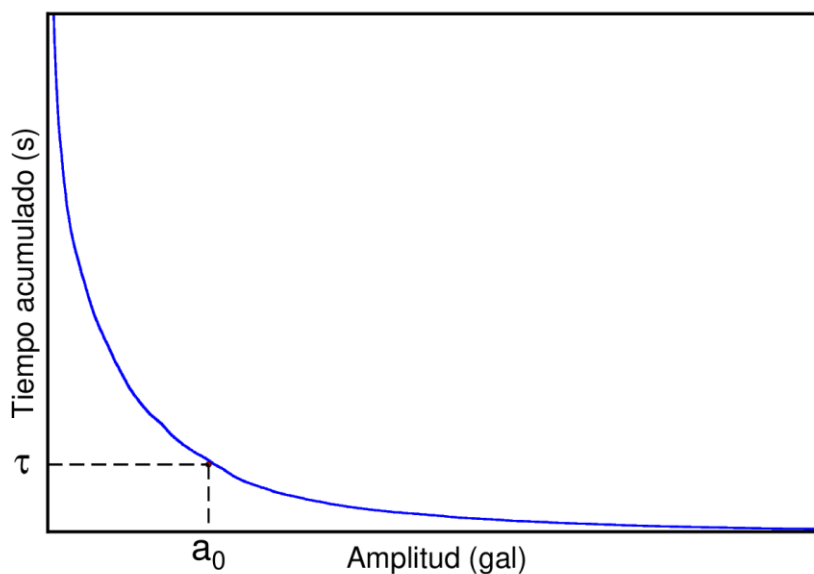


Figura 2. Esquema del intervalo de tiempo 0.3 s donde se mide la amplitud usada en la ecuación 2

El terremoto de Limón de 1991, uno de los que ha provocado más destrucción a la infraestructura y cobrado decenas de víctimas mortales en años recientes, no figura en la lista. La razón es que en esa época el LIS no poseía instrumentos en la región del Caribe y por tanto no está incluida.

La figura 3 muestra un mapa resumen que contiene el valor de IJMA más alto registrado por estación, independientemente del evento sísmico que lo haya generado. Esta distribución geográfica permite ver lo siguiente:

1. Los valores más altos de IJMA=6- han ocurrido en el Pacífico Norte y Sur del país. Estos están asociados al terremoto del 05 de setiembre del 2012 (Mw 7.6) y los del 12 de mayo y 26 de junio del 2019 (Mw 6.1 y 6.4 respectivamente).

2. En el Pacífico Central el valor más alto registrado ha sido IJMA=5+. Esto a pesar de que en la zona se ha producido dos eventos importantes en cuanto a la magnitud como el del 31 de mayo del 2010 (Mw 5.9) y el del 13 de noviembre del 2017 (Mw 6.5). La cercanía de las estaciones al epicentro de estos eventos puede haber influido en este resultado, así como la profundidad de los mismos (18 y 21 km respectivamente).

3. En las cercanías de San José no se ha registrado un valor mayor a IJMA=5-. El valor en rojo de Alajuela corresponde al evento del 22 de diciembre de 1990 y el de San Ramón al del terremoto del 05 de setiembre del 2012.

4. En la provincia de Limón se han presentado los valores de intensidad más bajos, con valores máximos de IJMA=4. Sin embargo, esto se debe a que no existe un registro acelerográfico cerca de la zona epicentral cuando se presentó el terremoto de Limón del 22 de abril de 1991.

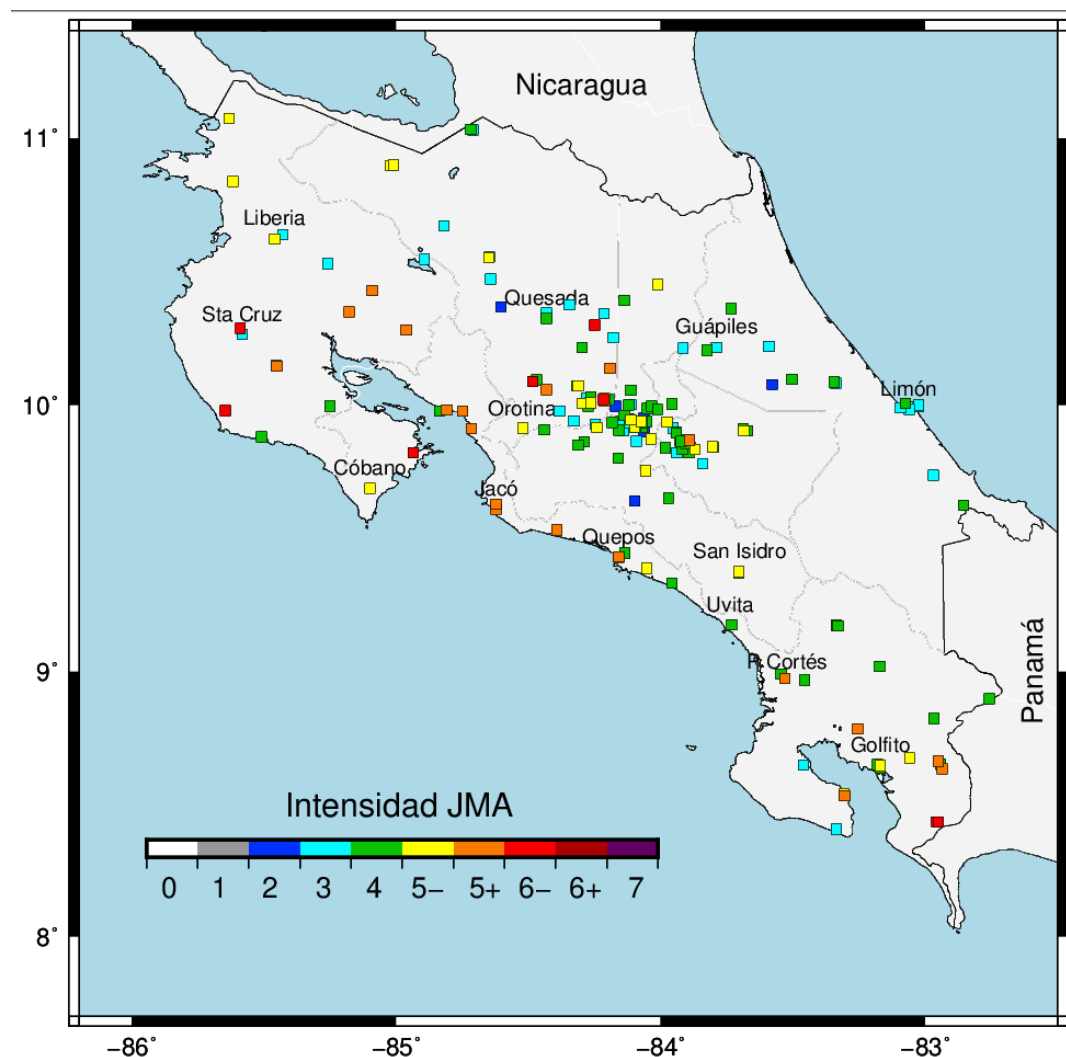


Figura 3. Mapa de todas las estaciones del LIS desde 1983 hasta el 2019. Las estaciones aparecen coloreadas según el valor de intensidad JMA más alto que se haya registrado en cada una a lo largo de ese tiempo.

La Figura 4a muestra la relación de IJMAI con aceleración máxima. El resultado muestra una buena correlación entre ambas, aun cuando hay dispersión en los valores bajos. Una posible explicación para esto puede ser que hay una alta concentración de estaciones en la región central del país. Para un mismo evento a una distancia dada, habrá muchos puntos muy cercanos entre sí que mostrarían diferencias debido al tipo de suelo o la topografía. En este resultado también puede influir el tipo de instrumento analógico y los QDR, que como se indicó, eran de baja resolución comparados a equipos más recientes. La curva de mejor ajuste da la siguiente relación:

$$IJMAI = 0.875298 (+/- 0.008434) \log(PGA) + 0.0975688 (+/- 0.02324) \quad (3)$$

Por otro lado, si hacemos una selección por eventos mayores a Mw6.0 y de la era digital (2010 al presente), se obtiene un resultado como el de la figura 4b.

$$IJMAI = 0.829975 (+/- 0.009476) \log(PGA) + 0.6177260 (+/- 0.03008) \quad (4)$$

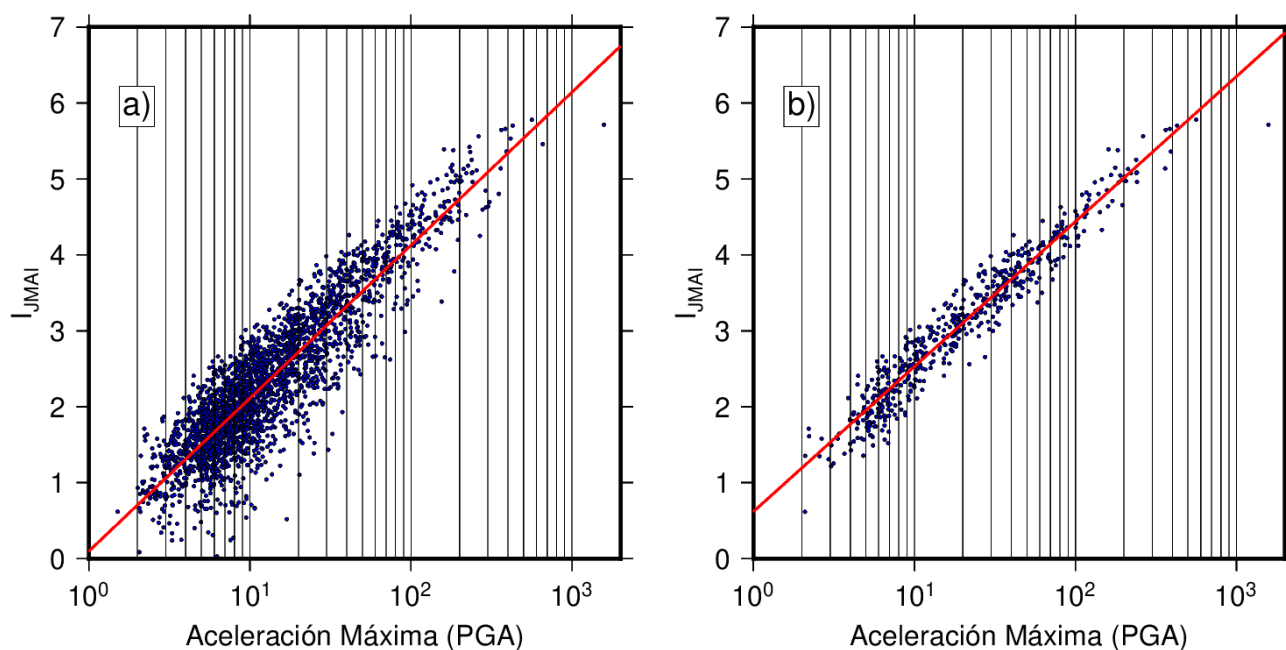


Figura 4. Relación de la intensidad instrumental JMAI con la aceleración máxima del suelo (a) usando todos los registros acelerográficos (b) usando solo los de sismos con magnitud mayor a 6.0 y del 2010 al 2019.

La relación de IJMAI con la magnitud y la distancia se graficó en la figura 5 en forma de una matriz a color con los valores de JMA en la vertical. Los datos así mostrados reflejan la variación de la IJMA en función de la distancia y la magnitud como si se tratara de un relieve topográfico. Entre más grande sea la magnitud de un evento, mayores van a ser los valores de intensidad en las diferentes distancias. Un sismo muy fuerte como el del 05 de setiembre del 2012 de Mw7.6 puede producir valores de JMA 6- en estaciones cercanas a los 20 km de distancia del epicentro y de intensidad 4 en San José. Por otro lado, un sismo de menor magnitud como el del 26 de junio del 2019 de Mw6.4 puede generar el mismo de JMA 6- en la zona epicentral, pero de 3 en San José.

Conforme nuevos eventos sísmicos sucedan en el futuro, se pueden ir añadiendo a esta matriz que podría eventualmente incorporarse al MAS-LIS (Moya 2019). En la actualidad, el MAS-LIS calcula la localización del

epicentro, pero no la magnitud del evento, únicamente la intensidad en los sitios de registro. Sin embargo, si el cálculo de la magnitud se incorporara a dicho sistema, se podría generar un escenario de los valores aproximados de intensidades que se podrían esperar en las diferentes estaciones acelerográficas en tiempo real.

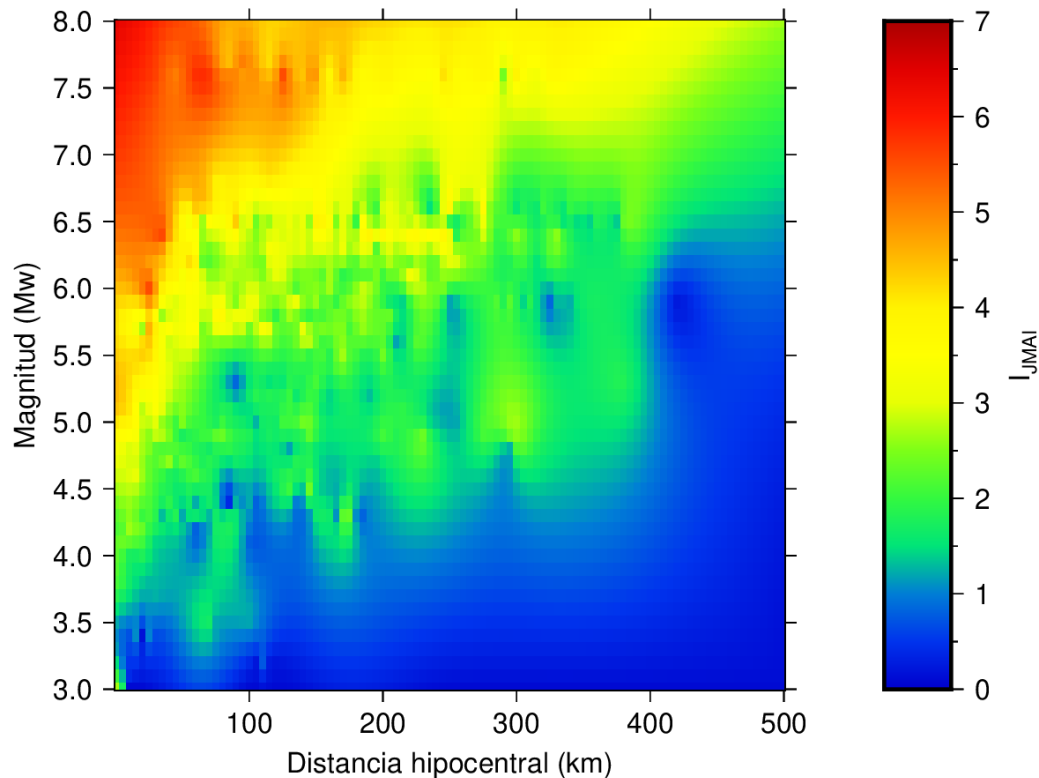


Figura 5. Relación de la intensidad instrumental JMAI en función de la distancia hipocentral y la magnitud. La escala de valores JMAI se muestra a la derecha.

CONCLUSIONES

Se llevó a cabo el cálculo de la intensidad JMA para varios de los registros del LIS desde 1990 a junio del 2019. Se observó que la intensidad más alta registrada de esta manera fue de 6- en cinco sitios: Alajuela, Finca Naranjo y Laurel de Corredores, Nosara, Santa Cruz y San Ramón.

La distribución espacial y temporal de los datos mostrada en la Figura 4 indican que la zona del Pacífico Central no se han registrado valores superiores a 5-. En la zona del Caribe los valores son bajos debido a la falta de registros de sismos fuertes.

Con el fin de verificar los valores de la matriz obtenida en la figura 5, se realizó un cálculo numérico de un posible sismo que ocurriera en la Península de Osa. Según el Workshop Report No 278 "Tsunami Hazard in Central America: Historical Events and Potential Sources" del Intergovernmental Oceanographic Commission, la zona sur de Costa Rica podría generar un sismo de magnitud 7.6 si se rompiera una longitud de 117 km a lo largo de la zona de subducción en la zona sur. Aquí hemos simulado el impacto que tendría un sismo de Mw 7.4 correspondiente al rompimiento de un segmento de 60 x 50 km en la zona mostrada en la figura 6. Se asumió un mecanismo similar al del Global CMT para el sismo de Mw 7.4 de 1983. La estrella roja indica la ubicación del epicentro que se ha localizado a unos 15 km de profundidad en el centro de la zona de ruptura.

El programa *Broadband Platform (BBP)* desarrollado por el Southern California Earthquake Center (SCEC) (Silva et al., 2018) se usó para generar un modelo de ruptura y las formas de onda de estaciones seleccionadas. El BBP es una colección de diferentes códigos abiertos para simulaciones numéricas en el rango 0-100 Hz. Con este software se puede obtener la forma de onda de cualquier evento fuerte del que se proporcionen los parámetros de la fuente (tales como tipo de falla, magnitud y profundidad del sismo) así como un modelo de propagación de velocidad en 1D.

Desafortunadamente el programa en la etapa de desarrollo en que se encuentra, no permite que se utilice un modelo de velocidades distinto de los que se han predefinido. La recomendación de los autores para usuarios de sitios no contemplados en el código, es usar un modelo similar a alguno de los incluidos. En nuestro caso, se seleccionó el modelo del suroeste de Japón por tratarse de una zona de subducción similar a la nuestra.



Figura 6. Mapa de ubicación del epicentro (estrella roja) estaciones acelerográficas (cuadros blancos) y zona de ruptura (zona punteada) para un hipotético sismo de Mw 7.4 que ocurriera en la península de Osa.

Para un evento de Mw 7.4, se produciría un desplazamiento máximo en la falla de unos 5.3 m con una duración de aproximadamente 25s. Los registros de aceleración obtenidos de la simulación alcanzaron valores máximos de aceleración del orden de 400-500 cm/s^2 cerca de la zona epicentral.

Los datos sintéticos de las tres componentes fueron procesados para calcular la intensidad JMA de manera similar a como se hizo con los registros observados. La tabla 3 muestra los valores calculados de los datos sintéticos y los obtenidos por la matriz de la figura 5.

Los valores obtenidos indican que la matriz sobreestima los datos a partir de distancias superiores a los 50 km aproximadamente. Sin embargo, también hay que considerar el hecho que el programa de simulación hace uso de un modelo 1-D que, además de la simplificación del mismo, no es propiamente el de Costa Rica, lo cual podría tener cierta influencia en el resultado.

Tabla 3. Comparación de los valores de JMA obtenidos usando modelos numéricos de un hipotético sismo de Mw 7.4 en la Península de Osa y los calculados de la matriz de la figura 5.

Estación	Valor sintético	Valor de la matriz
La Palma	6-	6-
Golfito	5-	5+
Ciudad Cortés	5+	5+
Punta Uvita	5-	5+
Quepos	4	5-
San Isidro	4	5-
San José	3	4

A pesar de las generalizaciones que se ha hecho en el modelo numérico por un lado y de la interpolación de los valores de la matriz de la figura 5 por el otro, el resultado es aceptable. La matriz se podría implementar en un sistema automático como el MAS-LIS con el fin de predecir valores aproximados de intensidad a diferentes distancias del epicentro de un potencial sismo futuro.

Agradecimientos: Este trabajo ha sido posible gracias al financiamiento que recibe el Laboratorio de Ingeniería Sísmica a través de la Ley Nacional de Emergencias y los proyectos de investigación inscritos en la Vicerrectoría de Investigación de la Universidad de Costa Rica. Se agradece a los técnicos Esteban López, Esteban Cordero y Arturo Jiménez por el trabajo de instalación y mantenimiento de la red del LIS. Varios de los mapas, cálculos de interpolación y algunos gráficos fueron elaborados con el GMT (Wessel et al, 2013) y el programa SAC (Goldstein et al, 2003).

REFERENCIAS

Agencia Meteorológica de Japón, <https://www.jma.go.jp/jma/en/Activities/inttable.html>

Arias, A. (1970). "A Measure of Earthquake Intensity". In: Hansen, R J (ed) "Seismic Design for Nuclear Powerplants". MIT Press, Cambridge MA, pp 438-483.

Barquero, R. y Rojas, W. (2010). "Resumen de la Actividad Sísmica en Costa Rica Durante el Año 2009". Rev Geol Am Central, 42, pp. 127-134.

Dobry, R., Idriss, I.M. and Ng, E. (1978) "Duration Characteristics of Horizontal Components of Strong Motion Earthquake Records", Bull Seism Soc Am, Vol. 68, pp. 1487-1520.

Goes, S., A. Velasco, S. Schartz y T. Lay (1993). "The April 22, 1991, Valle de la Estrella, Costa Rica (Mw = 7.7) Earthquake and its Tectonic Implications: A Broadband Seismic Study". Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 98 (B5), pp. 8127-8142.

- Goldstein, P., Dodge, D., Firpoand, M., & Lee Minner, S. (2003). "SAC2000: Signal Processing and Analysis Tools for Seismologists and Engineers", Invited contribution to "The IASPEI International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology", Edited by WHK Lee, H. Kanamori, P. C. Jennings y C. Kisslinger, Academic Press, London.
- Housner, G. W. (1952). "Spectrum Intensities of Strong-Motion Earthquakes," Proc. of the Symposium on Earthquakes and Blast Effects on Structures. Earthquake Engineering Research Institute.
- Linkimer, L. (2008). "Relationship between Peak Ground Acceleration and Modified Mercalli Intensity in Costa Rica". Rev. Geol Am Central, 38, pp. 81-94.
- Moya, A. (2006). "Nuevo formato de datos para el Laboratorio de Ingeniería Sísmica del Instituto de Investigaciones en Ingeniería de la Universidad de Costa Rica". Ingeniería 16 (2): pp. 63-74
- Moya, A. (2017). "Sistema de Monitoreo Acelerográfico del Laboratorio de Ingeniería Sísmica". Ingeniería 28 (1): pp. 96-114.
- Moya, A. (2019). "Monitoreo Acelerográfico Secundario del Laboratorio de Ingeniería Sísmica (MAS-LIS) y su potencial para usarlo como un sistema de alerta temprana para terremotos", Ingeniería 29(1): pp. 1-20.
- Montero, W. y Rojas, W., (2014). "Las fallas Purires y Picagres, y su Relación con la Secuencia Sísmica del Puriscal de 1990". Rev Geol de Am Central, 50, pp. 39 – 69.
- Pacheco, J.F.; Quintero, R.; Vega, F.; Segura J.; Jiménez, W. & González, V. (2006). "The Mw 6.4 Damas, Costa Rica, Earthquake of 20 November 2004: Aftershocks and Slip Distribution". Bull Seism Soc Am, Vol 96, pp. 1332-1343. doi:10.1785/0120050261
- Protti, M., McNally, K., Pacheco, J., González, V., Montero, C., Segura, J., Brenes, J., Barboza, V., Malavassi, E., Güendel, F., Simila, G., Rojas, D., Velasco, A., Mata, A. y Schillinger, W., (1995). "The March 25, 1990 (Mw=7.0, ML=6.8), earthquake at the entrance of the Nicoya Gulf, Costa Rica: Its prior activity, foreshocks, aftershocks, and triggered seismicity", Journal of Geophysical Research, v. 100, p. 20,345–20,358, <https://doi.org/10.1029/94JB03099>.
- Schmidt, V., Moya, A., Boschini, I., Climiet, A. y Rojas, W. (2005). "Microzonificación Sísmica de San José, Costa Rica". Editorial de la Universidad de Costa Rica, C.D.
- Shabestari, K. y Yamazaki, F. (2001). "A Proposal of Instrumental Seismic Intensity Scale Compatible with MMI Evaluated from Three-Component Acceleration." Earthq. Spectra, Vol. 17, No. 4, pp 711–723.
- Silva, F., Maechling, P. J., Goulet, C. A. y Vidale, J. E. (2018). "The SCEC Broadband Platform: Open-Source Software for Strong Ground Motion Simulation and Validation." Poster Presentation at 2018 SCEC Annual Meeting.
- Sokolov, V. (2013). "Three Techniques for Estimation of Instrumental Intensity: a Comparison." The 2013 World Conference on Advances in Structural Engineering and Mechanics (ASEM13). Jeju, Korea, September 8-12.
- Tselentis, G. y Danciu, L. (2008) "Empirical Relationships between Modified Mercalli Intensity and Engineering Ground-Motion Parameters in Greece". Bull Seism Soc Am, Vol 98, pp. 1863-1875.
- Trifunac, M.D. and Brady, A.G. (1975) "A Study on the Duration of Strong Earthquake Ground Motion", Bull Seism Soc Am, Vol. 65, pp. 581-626.

- Wald, D. J., V. Quitoriano, T. H. Heaton, and H. Kanamori (1999). "Relationships between Peak Ground Acceleration, Peak Ground Velocity, and Modified Mercalli Intensity in California", *Earthq. Spectra* 15, no. 3 557–564.
- Wessel, P., Smith, W. H. F., Scharroo, Luis, J. F., y Wobbe, F. (2013). "Generic Mapping Tools: Improved version released", *EOS Trans. AGU*, 94, pp. 409-410.
- Worden C. B., Gerstenberger M.C., Rhoades D.A., Wald D.J. (2012), "Probabilistic relationships between ground-motion parameters and Modified Mercalli intensity in California", *Bull Seism Soc Am* 102: 204-221, doi:10.1785/0120110156